VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

Февраль 2004 г. **Том 174, № 2**

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Создание теории Бора и ее развитие

(к 90-летию боровской теории атома)

В.П. Милантьев

Статья посвящена истории создания и развития атомной теории Бора. Даже теперь, когда существует последовательная квантовая теория, теория Бора не является просто достоянием истории, представляющим чисто методический интерес. Идеи этой теории до сих пор являются не только прекрасным введением в атомную физику, но и успешно используются при рассмотрении ридберговских состояний атомов, экзотических атомов и т.п.

PACS numbers: **01.65.+g**, **03.65.–w**

Содержание

1. **Введение (209).**
2. **Почему были необходимы квантовые постулаты? (210).**
3. **Экспериментальное доказательство постулатов Бора (212).**
4. **Боровская модель атома (212).**
5. **Триумф теории Бора (213).**
6. **Обобщение теории Бора (214).**
7. **Несостоятельность теории Бора (215).**

Список литературы (215).

1. Введение

Великие открытия XIX века — спектральные закономерности, открытие электрона, рентгеновского излучения, радиоактивности и др. — привели к пониманию того, что атома как мельчайшей неделимой частицы вещества не существует в природе, что атом имеет структуру. Среди различных атомных моделей, рассматривавшихся в начале XX века, наиболее распространенной была капельная модель атома, или модель пудинга, которую предложил открыватель электрона Дж.Дж. Томсон (Joseph John Thomson, 1856–1940). Согласно этой модели атом рассматривался как "*сфера однородной положительной электризации*", внутри которой вкраплено (как изюминки в пудинге) определенное количество электронов, нейтрализующих положительный заряд атома. Однако убедительные эксперименты, выполненные под руководством Резерфорда (Ernest Rutherford, 1871–1937) в 1909–1912 годах, показали, что положительный заряд атома сосредоточен в незначительной его части — в ядре. На основе результатов этих экспериментов Резерфорд предложил планетарную модель атома, согласно которой электроны в атоме, подобно планетам, обращаются вокруг ядра [1]. Однако по законам классической физики атом в такой модели не должен существовать в природе. В самом деле, согласно электродинамике, электрон, обращающийся вокруг ядра, должен терять свою энергию на излучение. Энергия вращающегося электрона связана с радиусом его орбиты, поэтому с уменьшением энергии из-за излучения уменьшается также радиус орбиты электрона. Процесс излучения происходит непрерывно, и электрон, в конце концов, должен "упасть" на положительный центр притяжения. Как рассчитал Шотт (G.A. Schott) еще в 1904 году, "падение" электрона на ядро должно произойти практически мгновенно, за время порядка 10^{-11} с. Кроме того, по мере приближения к ядру электрон должен вращаться все быстрее, что должно было бы приводить к непрерывному повышению частоты испускаемого света. Между тем наблюдается совсем другое: если атом испускает свет, то этот свет характеризуется набором дискретных длин волн. В связи с этим Эренфест (P. Ehrenfest, 1880–1933) остроумно отметил: "*Вопрос заключается в следующем: почему атом испускает чистый тон, а не шум, подобный мяуканью кота*?"

Таким образом, эксперименты Резерфорда создали тупиковую ситуацию. Надо было отказываться либо от электродинамики, либо от планетарной модели. Большинство физиков того времени считало, что не следует отказываться от электродинамики, которая была подтверждена многочисленными экспериментами и нашла практические применения. Кроме того, из величин, характеризующих планетарный атом — заряд, масса электронов и ядер — невозможно составить величину, имеющую размерность длины, которая давала бы оценку размеров атома. По этим причинам до 1913 г. эту модель физики старались не замечать. Резерфорд

В.П. Милантьев. Российский университет дружбы народов,
117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая 6, Российская Федерация
Тел. (095) 955-08-13
E-mail: vmilantiev@mx.pfu.edu.ru

Статья поступила 26 мая 2003 г.,
после доработки 18 июня 2003 г.

© В.П. Милантьев 2004

прекрасно понимал трудности планетарной модели, и он говорил в то время: "*Вопрос об устойчивости предлагаемого атома не нуждается в рассмотрении на этом этапе, так как устойчивость, несомненно, зависит от тонкостей строения атома и от движения его заряженных составных частей*" [1].

Выход из этого тупика нашел великий датский физик Нильс Бор (Niels Henrik David Bohr, 1885 – 1962) [2].

Нильс Бор родился в Копенгагене в высокообразованной семье профессора физиологии. После защиты докторской диссертации по электронной теории металлов в Копенгагенском университете Нильс Бор осенью 1911 года уехал на стажировку в Кембридж для работы в знаменитой Кавендишской лаборатории, где Дж.Дж. Томсон в 1897 году открыл электрон. В 1906 году Дж. Дж. Томсон получил Нобелевскую премию "*за теоретические и экспериментальные исследования электропроводности газов*". Ко времени приезда Бора в лабораторию Томсон был увлечен усовершенствованием своей модели атома и ее приложениями, и совершенно не интересовался работой Нильса Бора. Вскоре Бор увидел Эрнеста Резерфорда — самого выдающегося из учеников Дж. Дж. Томсона и попросился к нему на стажировку. Весной 1912 года Бор переехал в Манчестер, где Резерфорд возглавлял кафедру и лабораторию в университете Виктории. Так их свела судьба, уготовившая Бору участь "спасителя" резерфордовской модели атома. Бор стал центральной фигурой в развитии квантовой теории строения атомов и идеологом "копенгагенской" интерпретации квантовой механики, созданной в 1925 – 1927 годах. Известны также его работы в области ядерной физики.

2. Почему были необходимы квантовые постулаты?

Бор сразу же стал сторонником планетарной модели, хотя многими годами позже он признался: "*Я никогда не воспринимал планетарную модель буквально*". Для Бора это был лишь образ, а не истинное изображение атома. Поскольку атомы в природе существуют и в обычных условиях стабильны, то проблема планетарного атома оказывается проблемой устойчивости электронов, обращающихся вокруг ядер атомов, а это в свою очередь сводится к проблеме устойчивости атомных размеров. Из факта существования атомов следует, что должны быть в природе такие минимальные расстояния от ядра, ближе которых электроны не могут находиться. Обдумывание этой проблемы привело Бора к гениальной мысли, что должна существовать глубинная связь между наименьшим расстоянием электронов в атоме и наименьшим квантом действия. Впоследствии Бор вспоминал: "*В раннюю пору моего пребывания в Манчестере, весной 1912 года, я пришел к убеждению, что строение электронного роя в резерфордовском атоме управляется квантом действия — постоянной Планка*". Но это означало, что, принимая планетарную модель атома, необходимо было отказаться от классических представлений. Позднее Бор говорил: "*Решающим моментом в атомной модели Резерфорда было то, что она со всей ясностью показала, что устойчивость атомов нельзя объяснить на основе классической физики и что квантовый постулат — это единственно возможный выход из острой дилеммы. Именно эта острота несоответствия заставила меня абсолютно поверить в правильность квантового постулата*".

В конце 1912 года после завершения стажировки Бор оставил Резерфорду "Памятную записку", в которой он впервые высказал идею об устойчивости орбит и о связи электронных орбит со строением периодической системы элементов. Это была его грандиозная программа — объяснить не только устойчивость планетарной модели, но и дать объяснение "*свойств материи, зависящих от системы электронов в атоме*". В своем ответе Резерфорд советовал не спешить с выводами. Но вскоре выяснилось, что спешить было надо. Оказалось, что к тому времени в Кембридже астрофизик Никольсон (J.W. Nicholson) опубликовал ряд статей, в которых он постулировал, что проекция момента импульса электрона в атоме L квантуется, т. е. принимает целочисленные значения: $L = nh/2\pi$, где n — целое число, h — постоянная Планка. На основе этого постулата Никольсон нашел дискретные орбиты атома, на каждой из которых, по его предположению, вращались группы электронов. По классическим представлениям, электроны должны излучать электромагнитные волны с частотой, равной их частоте обращения вокруг ядра. Это и предполагал Никольсон. С помощью такого предположения, приближенно справедливого, как потом оказалось, для сильно возбужденных состояний атомов, Никольсон объяснил многие особенности излучения солнечной короны и туманностей [3].

Вероятно, последним толчком к научному озарению Нильса Бора стала его случайная встреча в начале февраля 1913 года с сокурсником по университету Хансеном (H. Hansen), специалистом по спектроскопии [4]. Бор поделился с ним своими идеями о строении вещества на основе планетарного атома с орбитами, устойчивыми по каким-то непонятным причинам. В разговоре Хансен спросил Бора, как его теория объясняет спектральные закономерности, открытые Бальмером, Ридбергом и Ритцем. И тут выяснилось, что Бор ничего не знал об этих закономерностях. По воспоминаниям Бора: "*Как только я увидел формулу Бальмера, все немедленно прояснилось передо мной*". Это была минута научного озарения, и за короткий срок — менее чем за месяц — он подготовил первую, самую существенную часть своей работы "О строении атомов и молекул", которую он затем опубликовал в журнале "*Philosophical Magazine*, Series 6. Vol. 26, p. 1 – 25" в 1913 году [5].

До Бора обобщенную формулу Бальмера (J.Balmer, 1825 – 1898) и связанный с ней комбинационный принцип Ритца (W. Ritz, 1878 – 1909) многие рассматривали, как "забавную игру чисел". Бор впервые открыл глубинный физический смысл этой формулы, "увидев" в ней, как "рождаются" кванты излучающего атома. Он понял, что частота спектральной линии атома связана вовсе не с частотой обращения электронов вокруг ядра, как этого требовали классические представления, а с энергией излучения, возникающего при переходе атома из одного своего дискретного состояния в другое, при этом обобщенная формула Бальмера выступает как закон сохранения энергии в системе атом – излучение.

Основные предположения в своей теории Бор сформулировал следующим образом [5]:

"1. *Динамическое равновесие системы в стационарном состоянии можно рассматривать с помощью обычной механики, тогда как переход системы из одного стацио-*

нарного состояния в другое нельзя трактовать на этой основе.

2. *Указанный переход сопровождается испусканием монохроматического излучения, для которого соотношение между частотой и количеством выделенной энергии именно такое, которое дает теория Планка*".

Бор разъяснил сделанные им допущения: "*Первое допущение напрашивается само собой, поскольку известно, что при расчете движения электронов обычная механика теряет свою абсолютную применимость, и справедлива только для средних значений. С другой стороны, при расчетах динамического равновесия в стационарном состоянии, в котором нет относительных смещений частиц, нет необходимости различать действительные движения и средние... Стационарные состояния... отличаются своеобразной стабильностью; это проявляется в том, что всякое продолжительное изменение движения замкнутой системы представляет собой полный переход этой системы из первоначального состояния в другое, отличное от него стационарное состояние...*".

Бор подчеркивал, что "*принимая теорию Планка, мы признаем открыто недостаточность обычной электродинамики и решительно порываем с тесно связанной цепью положений этой теории*". Бор вполне осознавал, что "*второе допущение находится в очевидном противоречии с обычными идеями электродинамики, но кажется необходимым для объяснения экспериментальных фактов*". По этому поводу Макс фон Лауэ (M. Laue, 1879–1960) в то время возмущенно говорил: "*Но это чепуха! Уравнения Максвелла справедливы при всех обстоятельствах, электрон на орбите должен излучать*" [3].

В заключение своей работы Бор подвел итог сделанным предположениям:

"1. *Испускание (или поглощение) энергии происходит не непрерывно, как это принимается в обычной электродинамике, а только при переходе системы из одного "стационарного" состояния в другое.*

2. *Динамическое равновесие системы в стационарных состояниях определяется обычными законами механики, тогда как для перехода системы между различными стационарными состояниями эти законы недействительны.*

3. *Испускаемое при переходе системы из одного стационарного состояния в другое излучение монохроматично, и соотношение между частотой* ν *и общим количеством излученной энергии* E *дается равенством* $E = h\nu$, *где* h — *постоянная Планка.*

4. *Различные стационарные состояния простой системы, состоящей из вращающегося вокруг положительного ядра электрона, определяются из условия, что отношение между общей энергией, испущенной при образовании данной конфигурации, и числом оборотов электронов является целым кратным* $h/2$. *Предположение о том, что орбита электронов круговая равнозначно требованию, чтобы момент импульса вращающегося вокруг ядра электрона был бы целым кратным* $h/2\pi$.

5. "*Основное*" *состояние любой атомной системы, т.е. состояние, при котором излученная энергия максимальна, определяется из условия, чтобы момент импульса каждого электрона относительно центра его орбиты равнялся* $h/2\pi$ ...".

В дальнейшем предположения Бора в теории атомов были сформулированы в виде квантовых постулатов:



Нильс Бор

1. Существуют *стационарные* (не зависящие от времени) *состояния*, находясь в которых атомы не испускают и не поглощают энергию. Эти состояния характеризуются дискретным набором значений энергии E_1, E_2, E_3, ...

2. Испускание и поглощение излучения происходит при скачкообразном переходе атома из одного его дискретного состояния в другое, при этом энергия испущенного или поглощенного кванта определяется уравнением $h\nu = E_n - E_m$.

Первый постулат представляет собой, собственно, признание факта, что атомы в природе существуют. Но для этого необходимо по Бору считать, что атом может находиться лишь в состояниях с дискретными значениями энергии, и электроны в атомах обращаются вокруг ядра на определенных дискретных расстояниях. Находясь на минимальном расстоянии от ядра, электрон больше не может никуда "перескочить", так что он должен находиться в этом состоянии бесконечно долго. Так объясняется устойчивость атомов.

Второй постулат опирается на квантовую гипотезу Планка и является обобщением опытных результатов о спектральных линиях излучающего атома. Оценивая постулат о квантовых переходах, Эйнштейн [6] в 1916 году писал: "*...Ныне можно утверждать, что он принадлежит к числу надежно установленных основ нашей науки*".

Постулаты Бора резко противоречат представлениям классической физики, но именно отказ от этих представлений и введение идеи квантов в мир атома, позволило Бору построить первую квантовую теорию атома.

3. Экспериментальное доказательство постулатов Бора

Существование дискретных состояний в атоме было непосредственно доказано в 1914 году в опытах Джеймса Франка (J. Franck, 1882–1964) и Густава Герца (G. Hertz, 1887–1975). Первоначально Франк и Герц, еще не зная теории Бора, ставили перед собой задачу об измерении потенциалов ионизации некоторых атомов, в частности, атомов ртути. Много лет спустя Франк признался: "*Поскольку в то время среди физиков господствовало откровенное недоверие к попыткам сконструировать модель атома при тогдашнем уровне знаний, то мало кто давал себе труд внимательно прочитать посвященную атому работу. Особо следует отметить, что Густав Герц и я вначале были неспособны понять огромное значение работы Бора*". Обсуждение результатов экспериментов Франка и Герца (рис. 1) привело к пониманию того, что на самом деле они измерили не *потенциал ионизации*, а *потенциал возбуждения* атомов ртути.

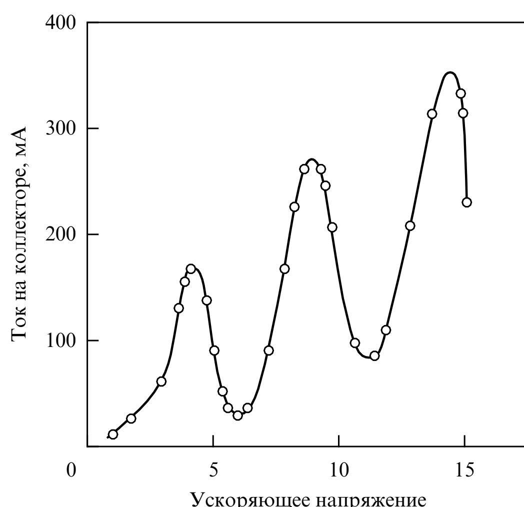


Рис. 1. Результат опыта Франка и Герца

Бор с удовлетворением воспринял опыты Франка и Герца. Он писал: "*Результаты этих опытов показали, что при соударениях с электроном атом не может получить произвольное количество энергии, а только такое ее количество, которое точно соответствует энергии, необходимой для перевода атома из нормального состояния в одно из остальных стационарных состояний; о существовании последних нам известно из данных о спектрах, поскольку энергия этих состояний тесно связана с величиной спектральных термов*".

4. Боровская модель атома

Первую попытку построить квантовую теорию атома водорода предпринял в 1910 году молодой в то время австрийский физик Гааз (A. Haas, 1884–1941). Основываясь на томсоновской модели атома и квантовых представлениях, он вычислил постоянную Ридберга, значение которой, однако, во много раз отличалось от экспериментального. Идеи Гааза в то время были подняты на смех за "наивную попытку" сочетать между собой столь "несовместимые вещи", как спектроскопия и квантовая теория излучения.

В своей работе Бор исходил из планетарной модели атома водорода и водородоподобных атомов [5]. В соответствии с планетарной моделью Бор рассматривал электрон, который движется со скоростью, намного меньшей скорости света, по замкнутой траектории вокруг ядра. "*Частота обращения* v *и главная ось орбиты* $2a$ *будут зависеть от количества энергии* W*, которую надо сообщить системе, чтобы удалить электрон на бесконечно большое расстояние от ядра*". Эти величины определяются формулами (в современных обозначениях) [7]:

$$v = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\,\frac{W^{3/2}}{Ze^2\sqrt{m}}\,, \quad 2a = \frac{Ze^2}{W}\,. \tag{1}$$

Затем Бор принял, что орбита, о которой идет речь, круговая, и использовал идею Планка о том, что количество энергии, испускаемой при каждом акте излучения, равно hv. Дальнейшие рассуждения Бора подтверждают гениальность хода его мыслей и поразительную физическую интуицию. Он предположил, что электрон вначале находится очень далеко от ядра и не обладает относительно него заметной скоростью и что после встречи с ядром электрон попадает на стационарную орбиту вокруг ядра. "*Теперь допустим, что электрон испускает монохроматическое излучение с частотой* v*, равной* ***половине частоты обращения электрона на своей окончательной орбите***". Именно такое предположение, являющееся, по сути, квантовым постулатом, приводит к правильному результату! Таким образом, положив

$$W = \frac{nhv}{2}\,, \tag{2}$$

с помощью формулы (1) Бор получил выражения:

$$W = \frac{2\pi^2 mZ^2e^4}{n^2h^2}\,, \quad v = \frac{4\pi^2 mZ^2e^4}{n^3h^3}\,, \quad 2a = Z\,\frac{n^2h^2}{2\pi^2 me^2}\,. \tag{3}$$

"*Если в этих выражениях придать* n *разные значения, получим ряд значений* W*,* v *и* a*, соответствующих ряду конфигураций системы. Согласно предыдущим рассуждениям мы приходим к выводу, что эти конфигурации соответствуют состояниям системы, в которых нет излучения энергии, а потому они будут стационарными, пока система не будет возмущена извне. Мы видим, что значение* W *максимально, когда* n *получает наименьшее значение, равное единице. Этот случай будет соответствовать наиболее устойчивому состоянию системы, т.е. будет соответствовать той связи электрона, для разрыва которой приходится затрачивать наибольшее количество энергии*".

Используя известные в то время значения физических постоянных, Бор получил оценки:

$$2a = 1{,}1 \times 10^{-8}\ \text{см}\,, \quad v = 6{,}2 \times 10^{15}\ \text{с}^{-1}\,, \quad \frac{W}{e} = 13\ \text{В}\,.$$

Отсюда "*Мы видим, что эти величины того же порядка, что и минимальные размеры атома, оптические частоты и ионизационные потенциалы*".

Согласно формулам (2) энергия, испущенная при образовании одного из стационарных состояний атома водорода, равна $W = 2\pi^2 me^4/(n^2h^2)$. Тогда "*количество*

энергии, испускаемой при переходе системы из состояния, соответствующего $n = n_1$, в состояние, соответствующее $n = n_2$", равно

$$W_{n_2} - W_{n_1} = \frac{2\pi^2 me^4}{h^2}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right).$$

С использованием квантового постулата $W_{n_2} - W_{n_1} = h\nu$ отсюда сразу же можно получить формулу Бальмера

$$\nu = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right) \equiv \mathrm{R}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right).$$

Эту формулу Бор вывел еще двумя способами. Это было блестящей победой теории, поскольку бальмеровская серия атома водорода нашла естественное объяснение, и к тому же стало возможным вычислить теоретически постоянную Ридберга

$$\mathrm{R} = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^3} = 3{,}1 \times 10^{15}\ \mathrm{c}^{-1}.$$

С учетом движения атомного ядра теоретическое значение постоянной Ридберга прекрасно согласуется с экспериментальным значением, полученным из самых точных спектроскопических измерений.

По мере увеличения энергии (увеличения числа n) разность между соседними уровнями энергии становится столь незначительной, что можно говорить о почти непрерывном изменении энергии. Но непрерывное изменение физических величин характерно для классической физики. Таким образом, при достаточно больших значениях числа n, которое Бор назвал *главным квантовым числом*, результаты квантовой теории должны совпадать с результатами, полученными на основе классических представлений. В этом заключается *принцип соответствия*, впервые сформулированный Бором в 1918 году в работе "О квантовой теории линейчатых спектров" [5]. Бор писал: "*Оказалось, что, хотя мы и должны отказаться от применения механики при описании перехода из одного стационарного состояния в другое, тем не менее, можно построить связную теорию этих состояний, пользуясь обычной механикой для описания движения в самих стационарных состояниях. Далее процесс излучения, связанный с переходом из одного стационарного состояния в другое, не может быть прослежен в деталях с помощью обычных электромагнитных представлений. Свойства излучения атома с точки зрения этих представлений обусловлены непосредственно движением системы и разложением этих движений на гармонические компоненты. Тем не менее оказалось, что существует далеко идущее* ***соответствие*** *между различными типами возможных переходов от одного стационарного состояния к другому, с одной стороны, и различными гармоническими компонентами — с другой*". Непосредственные расчеты по Бору показывают, что, например, частоты спектральных линий, соответствующих переходам между сильно возбужденными состояниями (при $n \gg 1$), равны частоте обращения электрона вокруг ядра и гармоникам этой частоты. Таким образом, при больших значениях главного квантового числа квантовые закономерности плавно переходят в классические закономерности, так что единство природы не нарушается. Вместе с тем Бор подчеркивал, что "*Принцип соответствия должен рассматриваться как чисто квантово-теоретический закон, который никоим образом не может уменьшить контраст между этими постулатами и классической электродинамикой...*".

В широком смысле принцип соответствия можно рассматривать как предположение о том, что квантовая теория содержит в себе классическую механику в качестве предельного случая. Такую идею высказал Планк еще в 1906 году. Он показал, что "*классическую теорию можно охарактеризовать просто как теорию, в которой квант действия бесконечно мал*" [8]. В дальнейшем в 1927 году Эренфест доказал, что в этом предельном случае средние значения квантовых величин подчиняются соответствующим уравнениям классической механики. Нильс Бор исходил из другой предпосылки. Он предположил, что при неизменной постоянной Планка и при частоте перехода, стремящейся к нулю, квантово-теоретические результаты должны сводиться к результатам, полученным на основе классических представлений. Принцип соответствия Бора оказался очень гибким и плодотворным инструментом в его теории.

За исследования строения атома Нильсу Бору в 1922 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

5. Триумф теории Бора

Теория Бора сразу же получила высокую оценку выдающихся физиков того времени — Эйнштейна, Лоренца, Планка, Резерфорда, Джинса, а Зоммерфельд активно включился в развитие теории. В первой своей большой (более 60 страниц) уже упоминавшейся статье Бор проанализировал все экспериментальные факты того времени, относящиеся к строению атомов и молекул, при этом он не столько заботился о математической корректности описания, сколько об оценках и качественном понимании явлений. Об этом много лет спустя писал Гейзенберг (W.Heisenberg, 1901–1976) в своей статье "Квантовая теория и ее интерпретация": "*Математическая ясность сама по себе не представляла для Бора какой-то особенной ценности. Он опасался, что формальная математическая структура скроет физическую сущность проблемы, и был убежден, что законченное физическое описание должно безусловно предшествовать математической формулировке*".

Убедительным доказательством справедливости теории Бора стало объяснение им спектральной серии, которую открыл в 1896 году астроном Пикеринг (E. Pickering, 1846–1919) в спектре звезды ζ Puppis. Эта серия — серия Пикеринга — очень напоминала серию Бальмера. Считалось, что она связана с водородом, находящимся в звездах в каком-то особом состоянии. Аналогичные серии наблюдал Фаулер (A. Fowler) в 1912 году в лабораторных исследованиях спектров смеси водорода и гелия в вакуумных трубках. Таким образом, возникла противоречивая совокупность фактов. Этот клубок противоречий распутал Бор. Из теории Бора следовало, что постоянная Ридберга для водородоподобного атома зависит от заряда его ядра: $\mathrm{R}_Z = Z^2\mathrm{R}_\mathrm{H}$, где R_H — постоянная Ридберга для атома водорода. Бор предположил, что серия Пикеринга принадлежит вовсе не водороду, а ионизованному гелию He^+. Вскоре предсказания Бора экспериментально подтвердили Пашен (F. Paschen, 1865–1947) и Эванс (E.J. Evans).

С учетом движения атомного ядра постоянная Ридберга для водородоподобного атома оказывается зависящей от массы ядра: $R_Z = Z^2 R_H/(1 + m_e/M_Z)$, где M_Z — масса ядра с номером Z. Это позволило объяснить *изотопическое смещение* спектральных линий. По такому смещению в 1932 году Юри (H. Urey, 1893 – 1981) открыл тяжелый изотоп водорода — *дейтерий*.

На основе своей теории Бор показал далее, что спектры орто- и парагелия относятся не к двум разным элементам, как в то время считалось, а к несколько различающимся состояниям одного и того же элемента — гелия. В 1915 году Бор впервые применил теорию относительности к электронам, вращающимся вокруг ядра. Он пришел к выводу, что с учетом релятивистской массы электрона только круговые орбиты могут быть стационарными, эллиптические же орбиты должны прецессировать.

Триумфальное шествие теории Бора связано также с исследованиями рентгеновских спектров. В 1914 году Коссель (W. Kossel, 1888 – 1956), используя идеи Бора, построил теорию рентгеновских спектров. Рано погибший в Первой мировой войне талантливый ученик Резерфорда Мозли (H.G.J. Moseley, 1887 – 1915) экспериментально нашел закон (закон Мозли), который позволяет по измеренной частоте (или длине волны) характеристического рентгеновского излучения точно установить атомный номер данного элемента, и, следовательно, заряд его ядра. Закон Мозли впервые продемонстрировал, что не атомный вес, а атомный номер, определяющий заряд ядра, является основной характеристикой атома при его расположении в периодической системе элементов. Так Мозли убедительно подтвердил гипотезу Ван ден Брука (A. Van den Broek, 1870 – 1926) о том, что решающую роль в расположении элементов в периодической системе играет не атомный вес, а заряд ядра, равный атомному номеру. Мозли писал: "*Эти данные являются важным критерием в вопросе о внутреннем строении атома, и решительно подкрепляют точку зрения Резерфорда и Бора*".

После блестящего успеха теории Бора в объяснении многих фактов он попытался на языке этой теории интерпретировать периодическую систему элементов, используя химические и спектроскопические данные своего времени. Об этом Бор сделал доклад в 1921 году в Физическом обществе в Копенгагене. Он к ядру с зарядом Ze прибавлял последовательно Z электронов, располагая их по различным орбитам, "*при этом приходится ставить вопрос так: как может быть образован атом при последовательном присоединении и связывании отдельных электронов в силовом поле ядра*?" Порядок заполнения электронных оболочек без учета принципа Паули, конечно, является неправильным. Тем не менее, еще не зная важных квантовых закономерностей, которые были открыты позднее, Бор все же уверенно дал "...*объяснение характерным отклонениям от простой периодичности в системе элементов*" и проследил "*образование семейства редкоземельных элементов*". Он пришел к выводу, что 72-й элемент по своим свойствам относится не к ряду редкоземельных элементов, как в то время ошибочно считал Довийе (A. Dauwillier), а является аналогом циркония. В конце 1922 года Костер (D. Coster) и Хевеши (G. Hevesy) действительно обнаружили в циркониевых рудах новый элемент с порядковым номером 72 в периодической системе элементов. Это стало очередной блестящей победой квантовой теории Бора. Новый элемент получил имя *гафний* в честь древнего названия столицы Дании.

Исследования Бора о распределении электронов в подгруппах у атомов в периодической системе элементов сыграли важную роль в открытии *принципа запрета*. Хотя в то время Бор не знал этого принципа, но вполне справедливо задавался вопросом, почему все электроны атома не сосредотачиваются в состоянии с наименьшей энергией, т.е. на *K*-оболочке. Это впоследствии отмечал Паули (W.Pauli, 1900 – 1958): "... *существенный прогресс, который был в то время достигнут благодаря исследованиям Бора, состоял в объяснении* (*на основе сферически-симметричной атомной модели*) *образования промежуточных оболочек атома и общих свойств редкоземельных элементов. Вопрос о том, почему все электроны атома в основном состоянии не находятся в самой внутренней оболочке, уже в ранних работах выделялся Бором как имеющий фундаментальное значение... он в частности рассмотрел заполнение самой внутренней K-оболочки атома гелия и существенную связь этого с двумя раздельными спектрами гелия — орто- и парагелиевыми спектрами. На основе классической механики нельзя было дать сколько-нибудь убедительного объяснения этого явления. На меня произвело сильное впечатление то, что Бор — и в то время, и в последующих дискуссиях — искал* ***общее*** *объяснение, которое было бы справедливо для заполнения* ***любой*** *электронной оболочки*..." [9].

Теория Бора совместно с принципом соответствия позволила разобраться в огромном количестве экспериментальных фактов, объяснить многочисленные явления и она по праву считалась прекрасной теорией своего времени. Она дала мощный толчок всему дальнейшему развитию атомной физики. Оценивая теорию Бора, Резерфорд в 1931 году говорил: "*Я считаю первоначальную квантовую теорию спектров, выдвинутую Бором, одной из самых революционных из всех когда-либо созданных в науке, и я не знаю другой теории, которая имела бы больший успех*". Так же высоко оценивал теорию Бора Эйнштейн: "...*Все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля, и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главнейшие законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это мне кажется чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли*".

6. Обобщение теории Бора

Теорию Бора обобщил в 1916 году Зоммерфельд (A. Sommerfeld, 1868 – 1951) на случай систем с несколькими степенями свободы [10]. Для этого были сформулированы правила квантования для систем со многими степенями свободы. Прежде всего, Зоммерфельд показал, что условие квантования боровских орбит вытекает из требования: $\oint p \, dq = nh$, где p и q — канонически сопряженные импульс и координата, а интегрирование проводится по замкнутому циклу периодического движения. Зоммерфельд предположил, что такое требование

следует перенести на каждую k-ю степень свободы рассматриваемой системы, вводя квантовое число n_k для этой степени свободы: $\oint p_k \, dq_k = n_k h$. Зоммерфельд рассматривал обобщенные правила квантования как фундамент квантовой теории, вместе с тем он считал, что это "*недоказанные и, вероятно, недоказуемые утверждения*". Лишь с созданием квантовой механики с помощью метода Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна (ВКБ) квантовые условия Бора – Зоммерфельда были выведены строго как некие приближения.

Развитие теории Бора привело к представлению о пространственном квантовании орбит [10]. Под пространственным квантованием понимали выделение определенных дискретных ориентаций плоскости орбиты в пространстве. Как писал Зоммерфельд, "*Бесспорно, пространственное квантование кеплеровских орбит принадлежит к самым неожиданным следствиям квантовой теории. По простоте вывода и результатов оно представляется почти волшебством*". Экспериментальное доказательство пространственного квантования орбит Зоммерфельд усматривал в зеемановском расщеплении спектральных линий и в опытах Штерна и Герлаха. Дальнейший анализ результатов опытов Штерна и Герлаха показал, однако, что в этих опытах был фактически открыт спин электрона.

7. Несостоятельность теории Бора

Несмотря на непосредственное экспериментальное подтверждение постулатов Бора, и успехов его теории в объяснении многочисленных экспериментальных фактов, в период с 1919 по 1925 годы стали все яснее проявляться трудности и недостатки этой теории. Теория описывала главнейшие свойства атомов, но смысл правил квантования оставался загадочным. Не зря Бор называл их постулатами, т.е. недоказанными предположениями. Их смысл стал ясен только после создания последовательной квантовой механики. Теория Бора оказалась фактически лишь теорией атома водорода и водородоподобных атомов. Попытки обобщения теории на случай даже следующего атома в периодической системе — атома гелия — ни к чему положительному не привели. Кроме того, по теории Бора можно было вычислить далеко не все физические величины. Даже в случае атома водорода можно было рассчитать частоты (или длины волн) спектральных линий, и не существовало общего принципа вычисления яркости или интенсивности этих линий. Для этой цели вводились дополнительные предположения, основанные на принципе соответствия — этой "*волшебной палочки*", как говорил Зоммерфельд. Все это, как с огорчением отмечал Бор, превратило его теорию "*почти в интуитивное угадывание истинных отношений*". Период с 1919 по 1925 годы называли периодом "*систематического угадывания*" на основе принципа соответствия. В 1924 году Зоммерфельд пророчески писал: "*С помощью своего принципа соответствия Бор пытается тесно увязать квантовую теорию с классической теорией излучения. Он действует по возможности индуктивно и на основе физических соображений, сопоставляя постепенно каждому квантовому числу период некоторого движения. Волшебная сила принципа соответствия полностью оправдалась при выводе правил отбора квантовых чисел, при рассмотрении сериальных и полосатых спектров. Принцип стал путеводной нитью для всех новых открытий Бора и его школы. Несмотря на это, я не могу считать его окончательно удовлетворительным уже из-за того, что в нем смешаны классические и квантовые точки зрения. Мне хотелось бы увидеть принцип соответствия как особо важное следствие будущей дополненной квантовой теории, а не как ее основание*". Это было сказано буквально накануне создания квантовой механики!

По существу теория Бора еще не была настоящей теорией, а фактически представляла собой набор постулатов, которые сочетали в себе явно непримиримое — классическую непрерывность (вращение на орбитах) и квантовые скачки. К тому времени появились новые экспериментальные факты, которые никак не могла объяснить теория Бора. Нужны были новые идеи, новые представления. Такие идеи в 1925 – 1927 годах были высказаны и разработаны Гейзенбергом, Дираком, де Бройлем, Шрёдингером, Борном, Паули, Бором, Эйнштейном и другими физиками, которыми были созданы основы современной квантовой теории [11].

Список литературы

1. Резерфорд Э *Избранные научные труды*: *Строение атома и искусственное превращение элементов* (Сер. "Классики науки", Отв. ред. Г Н Флеров) (М.: Наука, 1972)
2. *УФН* **80** (2) (1963)
3. Джеммер М *Эволюция понятий квантовой механики* (М.: Наука, 1985)
4. Данин Д С *Нильс Бор* (Сер. "ЖЗЛ") (М.: Молодая гвардия, 1978)
5. Бор Н *Избранные научные труды* Т. 1 (Под ред. И Е Тамма) (М.: Наука, 1970)
6. Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 3 (М.: Наука, 1966)
7. Ансельм А И *Очерки развития физической теории в первой трети XX века* (М.: Наука, 1986)
8. Планк М *Единство физической картины мира* (М.: Наука, 1966)
9. Паули В *Физические очерки* (Под ред. Я А Смородинского) (М.: Наука, 1975)
10. Зоммерфельд А *Строение атома и спектры* (М.: Гостехиздат, 1956)
11. Дорфман Я Г *Всемирная история физики с древних времен до конца XVIII века* Ч. 1, 2 (М.: Наука, 1974)

Creation and development of Bohr's theory (on the 90th anniversary of the Bohr theory of the atom)

V. P. Milant'ev
Peoples' Friendship University of Russia
ul. Miklukho-Maklaya 6, 117198 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-095) 955-08 13. E-mail: vmilantiev@mx.pfu.edu.ru

The history of the creation and development of Bohr's atomic theory is discussed. Even now, with a consistent quantum theory available, Bohr's theory is not simply the property of history, of methodological interest only. To this day, the ideas of the theory not only provide an excellent introduction to atomic physics, but are also used successfully in treating atomic Rydberg states, exotic atoms, etc.

PACS numbers: **01.65.+g, 03.65.−w**
Bibliography — 11 references
Received 26 May 2003, revised 18 June 2003